

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. Ломоносова

Физический факультет
кафедра общей физики и физики конденсированного состояния

Методическая разработка
по общему физическому практикуму

Лаб. работа № 33

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОЗДУХА

Описание составила ст. преп. Овченкова Ю.А.

Москва - 2012

Подготовил методическое пособие к изданию доц. Авксентьев Ю.И.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДСТИ ВОЗДУХА

Цель работы: определение коэффициента теплопроводности воздуха с помощью нагретой нити, расположенной коаксиально внутри трубки.

ТЕОРИЯ МЕТОДА

Перенос тепла от более нагретой части какого-либо тела к менее нагретой может осуществляться тремя способами: *конвекцией* (переносом какой-либо части жидкости или газа с одного места на другое), *теплопроводностью* (передачей энергии путем соударений молекул при тепловом хаотическом движении) и *лучеиспусканием* (передачей теплоты с помощью испускания и поглощения электромагнитных волн в основном в виде инфракрасного излучения). В этой работе рассматривается передача тепла путем теплопроводности.

При теплопроводности количество теплоты dQ , которое передается от одного слоя к другому, пропорционально отношению разности dT температур этих слоев к расстоянию между ними dx , площади S соприкосновения слоев и времени dt прохождения теплоты, т.е.

$$dQ = -\alpha \frac{dT}{dx} S dt. \quad (1)$$

Здесь величина $\frac{dT}{dx}$ называется градиентом температуры (*grad T*), α - коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств вещества, температуры и давления (для газов), а знак минус показывает, что тепло распространяется в сторону уменьшения температуры. Выражение (1) представляет собой эмпирическое уравнение теплопроводности и называется *законом Фурье*, а коэффициент α называется *коэффициентом теплопроводности*.

В данной работе коэффициент теплопроводности α определяется следующим образом. По оси цилиндрической трубки длиной L , внутри которой находится исследуемый газ, натянута металлическая нить. Если нить нагреть электрическим током до температуры T_H , а температуру T_{TP} трубки поддерживать постоянной, то в направлении радиуса трубки возникнет градиент температуры $\frac{dT}{dr}$. Через любую коаксиальную с нитью цилиндрическую поверхность радиуса r и площадью $2\pi rL$ будет идти поток тепла

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} = -\alpha \frac{dT}{dr} \cdot 2\pi rL. \quad (2)$$

Здесь потоком тепла мы назвали отношение количества тепла dQ , прошедшего через поверхность в течение некоторого промежутка времени dt , к величине этого промежутка времени. Если процесс стационарен (температуры T_H и T_{TP} постоянны), то величина потока Φ с течением времени не изменяется. Будем считать, что все тепло, выделяемое идущим по нити током, распространяется в виде потока от нити к стенкам, иначе говоря, поток тепла $\Phi = W$, где W - тепловая мощность тока, определяемая законом Джоуля-Ленца.

Путем несложных преобразований из выражения (2) можно получить:

$$W \frac{dr}{r} = -2\pi \varepsilon L \cdot dT \quad (3)$$

Пользуясь правилами дифференцирования, найдем

$$d(W \ln r) = d(-2\pi \varepsilon LT). \quad (4)$$

Возьмем интеграл от обеих частей этого равенства, учитывая, что в левой части радиус изменяется в пределах от r_H - радиуса нити до r_{TP} - внутреннего радиуса трубки, а в правой части температура изменяется в пределах от T_H - температуры нити до T_{TP} - температуры трубки:

$$\int_{r_H}^{r_{TP}} d(W \ln r) = \int_{T_H}^{T_{TP}} d(-2\pi \varepsilon LT). \quad (5)$$

В результате получится

$$W \ln \frac{r_{TP}}{r_H} = 2\pi \varepsilon L (T_H - T_{TP}). \quad (6)$$

Заменяв радиусы нити и трубки соответствующими диаметрами D_H и D_{TP} , найдем отсюда коэффициент теплопроводности

$$\varepsilon = \frac{W \ln \frac{D_{TP}}{D_H}}{2\pi L (T_H - T_{TP})}. \quad (7)$$

В корпус трубки ввернут датчик, показывающий ее температуру T_{TP} . Температуру нити T_H определяют по изменению ее электрического сопротивления при нагревании. В области применяемых температур сопротивление R металлической нити возрастает с увеличением температуры T по линейному закону

$$R = R_0 (1 + \alpha T), \quad (8)$$

где R_0 - сопротивление нити при температуре 0°C и α - температурный коэффициент сопротивления.

Пусть при начальной температуре T_{H0} (температуре корпуса трубки до нагревания) сопротивление нити равно R_{H0} , а при температуре нити T_H (при которой проводятся измерения теплопроводности) оно равно R_H . Тогда при помощи выражения (8) можно найти формулу для вычисления T_H :

$$T_H = T_{H0} + \frac{(R_H - R_{H0})(1 + \alpha T_{H0})}{\alpha R_{H0}}. \quad (9)$$

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Работа выполняется на *универсальном лабораторном комплексе ЛКТ-2*, который позволяет производить измерения различных процессов в газах. Общий вид установки представлен на рис.1. При выполнении работы используются *экспериментальный модуль*, *измерительная система ИСТ-2М* и соединительные провода.

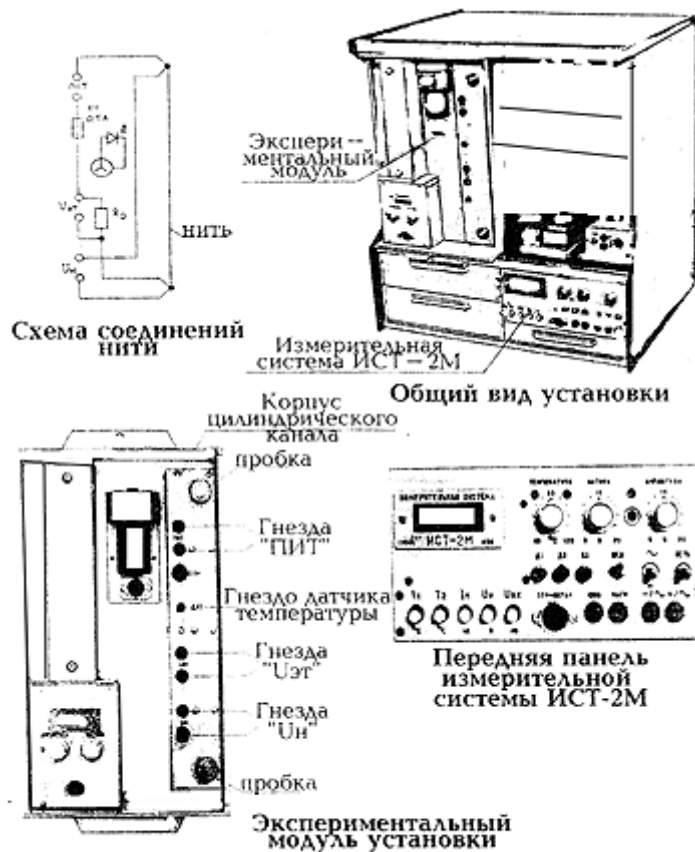


Рисунок 1.

В корпусе экспериментального модуля на передней панели расположен *цилиндрический канал (трубка)*, внутри которой натянута металлическая нить из сплава на основе никеля. Канал закрыт пробками. Нить подключена к гнездам « U_H » на панели модуля. Последовательно с нитью соединен эталонный резистор $R_{ЭТ}$, находящийся внутри корпуса и подключенный к гнездам « $U_{ЭТ}$ ». Схема соединений нити показана на рис.1. В корпусе модуля находится датчик температуры трубки (гнездо «ДАТ»).

К установке прилагается *мультиметр* (рис.2) - прибор для измерения в широких пределах ряда электрических величин (силы и напряжения постоянного и переменного тока, сопротивления резисторов, проверки качества диодов и транзисторов). *Переключатель* рода работ мультиметра

(конец стрелки, помеченный точкой) при любых переключениях проводов, идущих к мультиметру, должен стоять в положении «OFF».

Данные установки :

- диаметр нити – $D_H = 0,10 \text{ мм}$,
- внутренний диаметр трубки – $D_{TP} = 12 \text{ мм}$,
- длина нити – $L = 240 \text{ мм}$,
- эталонное сопротивление – $R_{ЭТ} = 10,0 \text{ Ом}$,
- температурный коэффициент сопротивления нити – $\alpha = 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$.

Блок ИСТ-2М (рис.1 и 3).

В этом блоке используются следующие элементы управления и индикации, расположенные на передней панели блока:

- тумблеры «СЕТЬ» ,
- индикатор, находящийся в левом верхнем углу панели,
- кнопка «Т1» включения отсчета температуры нити по индикатору,
- гнезда «ОБЩ» и «НАГР» для подключения питания нити,
- гнездо «Д» для подключения датчика температуры трубки,
- регулятор температуры нити «НАГРЕВ» ,
- тумблер «Нагр» включения нагрева нити.

СБОРКА СХЕМЫ

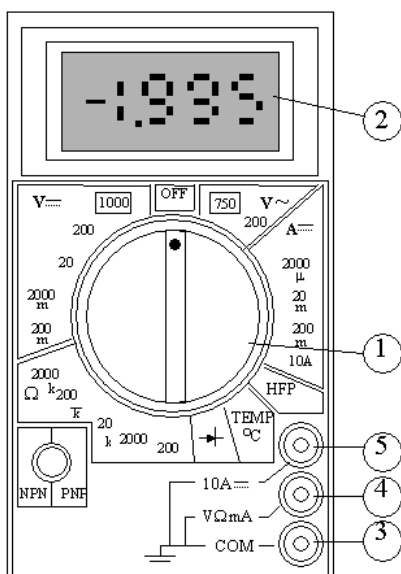


Рис.2

1. Убедиться, что установка отключена от сети, выключатели на передней панели измерительной системы ИСТ-2М выключены и ручки

«ТЕМПЕРАТУРА», «НАГРЕВ» и «АМЛИТУДА» повернуты против часовой стрелки до упора.

2. Включить источник питания в схему соединений нити. Для этого к гнездам «ПИТ» экспериментального модуля подсоединить проводами источник питания измерительной системы: гнезда «НАГР» и «ОБЩ» на ее передней панели.

3. Гнездо «ДАТ» датчика температуры корпуса трубки соединить кабелем с гнездом «Д1» измерительной системы.

4. Вставить штекеры измерительных проводов в гнезда на панели мультиметра: черный в гнездо ③ и красный в гнездо ④ (рис.2).

5. После *проверки правильности* сборки схемы преподавателем или лаборантом включить вилку установки в розетку на 220 В, а затем выключатель «СЕТЬ» на передней панели измерительной системы.

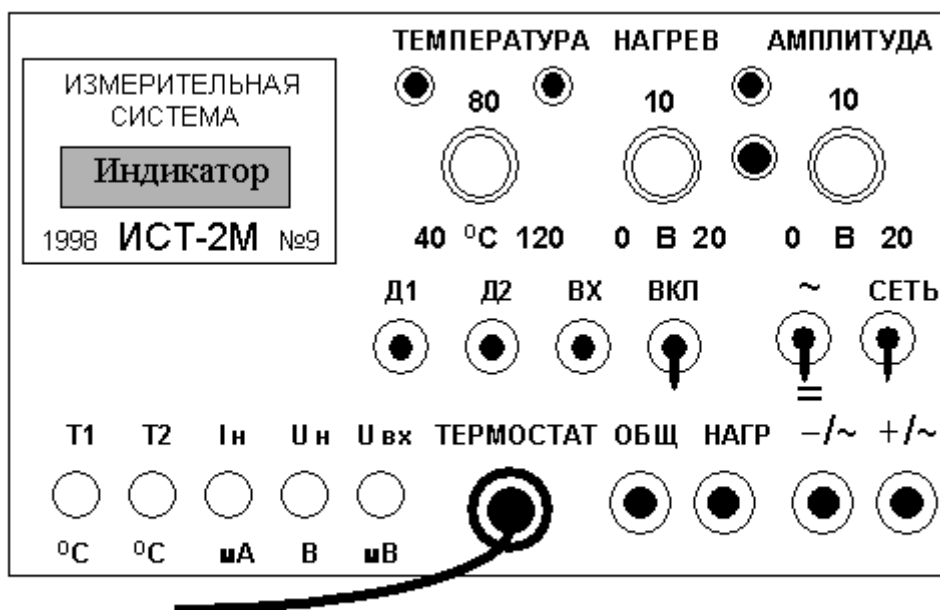


Рис.3

ИЗМЕРЕНИЯ

Измерение температуры трубки $T_{ТР}$ и сопротивления нити R_H при комнатной температуре

1. Приготовить таблицу для записи результатов измерений и полученных при расчете значений: результаты измерений, полученных в пунктах 2, 4 и 5, записываются в первой строке таблицы.

2. Нажать кнопку «Т1» на панели ИСТ-М2. Записать значение комнатной температуры трубки (в градусах Цельсия) с цифрового индикатора ИСТ-М2 в 1-ю строку 7-го столбца таблицы .

3. Включить тумблер «ВКЛ/НАГР» ИСТ-М2, поставив его в положение «ВКЛ».

4. Перевести переключатель мультиметра в положение «OFF».

Таблица

1	2	3	4	5	6	7	8
$U_{ЭТ}, мВ$	$U_H, мВ$	$I_{ЭТ}, мА$	$R_H, Ом$	$W, Вт$	$T_H, °С$	$T_{ТР}, °С$	$\alpha, Вт/(м \cdot К)$
		—	—	—	—		—

Присоединить мультиметр к гнездам « $U_{ЭТ}$ » экспериментального модуля (полярность подключения мультиметра соблюдать не требуется). Перевести переключатель мультиметра в диапазон измерения постоянного напряжения $V_{\text{—}}$ и установить его в положение « $2000 mV$ » (до двух тысяч милливольт). Показываемое мультиметром напряжение на сопротивлении R_0 записать в 1-й столбец таблицы. Поставить мультиметр в положение « OFF ».

5. Присоединить мультиметр к гнездам « U_H » экспериментального модуля. Установить его переключатель в то же положение, что и в пункте 4. Показываемое мультиметром напряжение на нити записать во 2-й столбец таблицы.

Измерение величин, необходимых для вычисления коэффициента теплопроводности воздуха

6. Накал нити производится токами, при которых напряжение $U_{ЭТ}$ на эталонном сопротивлении $R_{ЭТ}$ лежит в интервале $1500 \div 3600 мВ$. Шаг изменения напряжения $U_{ЭТ}$ составляет $(300 \pm 50) мВ$. Таким образом, напряжения, при которых производятся измерения, приблизительно равны $1500, 1800, 2100, 2400, 2700, 3000, 3300$ и $3600 мВ$.

Результаты измерений, произведенных согласно следующим пунктам, записываются в строки таблицы, начиная со второй.

7. Перевести переключатель мультиметра в положении « OFF » и присоединить его провода к гнездам « $U_{ЭТ}$ ». Установить переключатель мультиметра в то же положение, что и пункте 4. Очень медленно и осторожно поворачивать по часовой стрелке регулятор « $НАГРЕВ$ » на $ИСТ-М2$ и, контролируя напряжение на сопротивлении $R_{ЭТ}$ по показаниям мультиметра, установить первое из приведенных в пункте 6 значение напряжения. Если показания мультиметра содержат менее трех значащих цифр или видна

только цифра 1, стоящая на первом месте (знак перегрузки), то переключатель мультиметра следует передвинуть на одну позицию в ту или другую сторону, не выходя при этом из диапазона V_{\pm} .

Записать отсчитанное по мультиметру значение $U_{ЭГ}$ в первый столбец таблицы.

8. Вынуть провода мультиметра из гнезд « $U_{ЭГ}$ » и подключить их к гнездам « U_H » экспериментального модуля. Не изменяя положения регулятора «НАГРЕВ», сделать отсчет напряжения U_H по мультиметру, как это указано в пункте 7. Значение напряжения U_H записать во 2-й столбец таблицы.

9. Отсчитать значения температуры трубки $T_{ТР}$ по индикатору на ИСТ-М2 (кнопка «Т1» при этом должна быть нажата). Значение $T_{ТР}$ занести в 7-й столбец таблицы.

10. Выполнить пункты 7-9 для остальных значений $U_{ЭГ}$ из заданного в пункте 6 интервала и записать их в соответствующие строки таблицы.

11. По окончании измерений:

- перевести переключатель мультиметра в положение «OFF»,
- повернуть против часовой стрелки до упора (не прилагая при этом силы) регулятор «НАГРЕВ» на ИСТ-М2,
- выключить тумблеры «ВКЛ/НАГР» и «СЕТЬ» на ИСТ-М2,
- *показать результаты работы преподавателю или лаборанту,*
- отсоединить провода от экспериментального модуля, ИСТ-М2 и мультиметра.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Заполнить свободные клетки таблицы, руководствуясь следующим.

Ток нагрева нити $I_{ЭГ}$ и ее сопротивление R_H определяются из закона Ома:

$$I_{ЭГ} = \frac{U_{ЭГ}}{R_{ЭГ}} \quad \text{и} \quad R_H = \frac{U_H}{I_{ЭГ}} = \frac{U_H R_{ЭГ}}{U_{ЭГ}}.$$

Мощность, выделяемая нагретой нитью, определяется законом Джоуля-Ленца:

$$W = I_{ЭГ}^2 R_H = \frac{U_{ЭГ} U_H}{R_{ЭГ}}.$$

Температура нити T_H рассчитывается по формуле (9), причем за T_{H0} и R_{H0} принимаются соответственно значения $T_{ТР}$ и R_H из первой строки таблицы, т.е. значения при комнатной температуре. При вычислениях используются данные установки.

Коэффициент теплопроводности воздуха α рассчитывается по формуле (7). Следует обратить внимание на то, что величина α увеличивается с ростом температуры. Согласно теории, коэффициент теплопроводности газов должен увеличиваться пропорционально корню квадратному из температуры. Однако это увеличение происходит практически по линейному закону, так как в опыте не учитывались возможные потери тепла, вызванные конвекцией, лучеиспусканием и потоком тепла через торцы трубки.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие процессы называются процессами переноса? Когда они возникают? Являются ли эти процессы обратимыми?
2. Перечислите известные вам процессы переноса. Что общего между ними?
3. Каким образом может осуществляться перенос тепла?
4. Сформулируйте закон Фурье.
5. Как вводится и от чего зависит коэффициент теплопроводности?
6. Каким образом определяется коэффициент теплопроводности в данной задаче?

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов Д.В. Механика. М. Физический факультет МГУ, НЭВЦ ФИПТ, 1998.
§ 29 Движение вязкой жидкости.
2. Савельев И.В. «Курс физики», т.1. М.: Наука, 1989,
глава 12 –Явления переноса,
§ 78 – Длина свободного пробега молекул,
§ 79 – Эмпирические уравнения явлений переноса,
§ 80 - Молекулярно-кинетическая теория явлений переноса в газах.
3. Савельев И. В. Курс общей физики: уч. пособие. в 5 кн. кн. 3.
Молекулярная физика и термодинамика. М. Наука Физматлит, 1998.
Глава 7. Физическая кинетика.
§ 7.5 Вязкость газов.